

原子炉設計の最適化に関する基礎的研究

著者	北村 正晴
号	310
発行年	1970
URL	http://hdl.handle.net/10097/9046

氏 名（本籍）	北 村 正 晴（宮城県）
学 位 の 種 類	工 学 博 士
学 位 記 番 号	工 博 第 3 1 0 号
学位授与年月日	昭和46年3月25日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当
研究科専門課程	東北大学大学院工学研究科 （博士課程）原子核工学専攻
学 位 論 文 題 目	原子炉設計の最適化に関する基礎的研究

（主査）

論文審査委員	教授 梶山 一典	教授 畑中 浩
	教授 百田 光雄	助教授 竹田 宏

論 文 内 容 要 旨

第1章 緒 論

原子力発電の実用化が進み、それに伴って原子炉システムが大規模化する傾向が著しい現在、このシステムの設計を最適化して発電費を低下させることが強く望まれている。この設計最適化にあたっては、原子炉の長期にわたる運転法、すなわち、①一定期間ごとにおこなう核燃料交換の方式と②交換と交換の間における制御棒配分計画とがやはり最適化されていなくてはならない。これまでは①、②の最適化と設計最適化とはそれぞれが別個になされてきており、改善の余地が多く残されている。これは、上記のような燃焼過程に関する決定問題を効率良く解析できる手法が知られていないことによると考えられる。これをなしうる方法を開発し、これを用いてより現実性のある設計最適化を可能とすることを目的として本研究をおこなった。

第2章 制御棒計画最適化問題の定式化

原子炉は、その運転期間中常に臨界条件を満たしている必要がある。規格化された1次元体系について、この条件は次のように書かれる。

$$\frac{M^2}{H^2} \frac{\partial^2 \phi(x, t)}{\partial x^2} + [k_{\infty}(x) - 1 - k_{fb}(x, t) - u(x, t)] \phi(x, t) = 0 \quad (2-1)$$

ここで ϕ は中性子束、 k_{∞} は体系の無限大増倍率、 k_{fb} はフィードバック反応度、 u は制御反応度、 M^2 は移動面積(cm^2)、 H は体系の大きさ(cm)を表わしている。空間境界条件として

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_{x=1} + \left(\frac{1}{\lambda} \right) \phi \Big|_{x=1} = 0 \quad (2-2)$$

ここで λ は直線外挿距離(cm)の規格化された値で、これにより反射体の効果を近似的に表現することができる($\lambda=0$ で裸の炉、 $\lambda \rightarrow \infty$ で完全反射体)。この他に出力一定条件、出力ピーキング因子に関する制約、各物理量の非負条件などが満たされねばならない。

発電費の最小化は、核燃料の取出し燃焼度の最大化と密接に関連しており、この燃焼度 θ は、次のようにフィードバック反応度と結びついている。 $\theta(x, t) = \int_0^t \phi(x, t') dt' \quad (2-3)$

$$k_{fb}(x, t) = \alpha \cdot \theta(x, t) + \beta \cdot \phi(x, t) + \delta \cdot \frac{1 + \phi(x, t)}{1 + \phi(x, t)} \cdot \phi(x, t) \quad (2-4)$$

それゆえ、制御棒計画最適化問題は「式(2-3)、(2-4)により変化する体系の状態に対し、 $u(x, t)$ を適正に定めて、式(2-1)、(2-2)、その他の制約を満足できる時間を最大にせよ」と述べることができる。

この問題は、直接の求解は極めて困難である。ここで次の展開をおこなう。

$$\phi(x, t) = W_1(x) + a(t) \cdot W_2(t) \quad (2-5)$$

空間モード W_1 は、出力一定条件・境界条件を満たすように選ぶ。

このとき、第2モードの振巾の $a(t)$ を制御変数、 $b(t) (\equiv \int_0^t a(t') dt')$ を状態変数と見なすことにより、元の問題は：

$$\text{システム方程式} \quad \frac{db(t)}{dt} = a(t); \quad b(0) = 0 \quad (2-6)$$

$$\text{制約条件} \quad G_1(a, b, t) \geq 0 \quad (2-7) \quad G_2(a) \geq 0 \quad (2-8)$$

の下で、次の評価関数 J を最小にせよ；という問題に変換される。

$$J = - \int_0^T dt \quad T \text{ 未定} \quad (2-9)$$

この問題を拡張された最大原理を用いて解析し、最適解の求解法ならびに最適解軌道の性質に関する情報を得ることができた。

第3章 単一サイクルにおける最適制御棒計画

前章の考察から，制約条件が解の性質に決定的な影響力をもつことが知られた。この制約条件の効果を考えるため，式(2-7)と関連して $G_1(a, b, T) = 0$ (3-1) を満たす点 (a, b) の組む T をパラメータとして計算し， T -map なる軌跡群 (T の等高線) を得る。この T -map による検討と前章の考察とを併せ考えて，次の手続きで最適解が得られることが知られた。

1) 最適終端候補点 (T の最大値を与える点) から， $G_1 = 0$ ， $G_2 = 0$ を満たす逆時間軌道をそれぞれ計算する。

2) $t=0$ から出力分布一定 ($a(t) = \text{const.}$) で到達できる領域を求める。1) の逆時間軌道が，この領域まで到達することができれば，始めの候補点は，実現可能な点である。

3) 実現可能でない時は，正時間的に $a(t) = a_G(b, t)$ ，あるいは $a(t) = a_L(b, t)$ により定まる軌道を調べる。ここに a_G, a_L は式(2-7)を変形して

$$a_L(b, t) \leq a(t) \leq a_G(b, t) \quad (3-2)$$

とすることにより得られる。

各種の初期燃料分布に対する最適軌道をこの方法により求めた。初期燃料分布が均一に近い場合，最適解は一義的には定まらず無数に存在する。この場合は実際の運転上の便宜から，中性子束分布の変化がゆるやかな軌道 (modified consistent trajectory Tr_{mc}) が望ましいと考えられる。初期分布の不均一性が強くなると，外側部の燃料が高濃縮率の時は，制御変数 $a(t)$ が最小値 $a_L(b, t)$ をとる時の軌道 (lower boundary trajectory Tr_L) が最適となり，内側の燃料が高濃縮率の時は逆に $a(t)$ が最大値 $a_G(b, t)$ をとる時の軌道 (upper boundary trajectory Tr_U) が最適解となる。

これらの結果をまとめて表1に示した。燃料分布形は図1に示す燃料分布ならびに出力ピーキン

表1 最適運転法の分類

タイプ P.F.	1	2	3	4	5
1.7	U. Tr_L	N.U. Tr_{mc}	N.U. Tr_{mc}	N.U. Tr_{mc}	U. Tr_U
1.5	U. Tr_L	N.U. Tr_{mc}	N.U. Tr_{mc}	U. Tr_U	U. Tr_U
1.3	U. Tr_L	U. Tr_L	N.U. Tr_{mc}	U. Tr_U	U. Tr_U

N.U. ; 解が一義的でない

U. ; 解が一義的である

P.F. ; 出力ピーキングの制約値

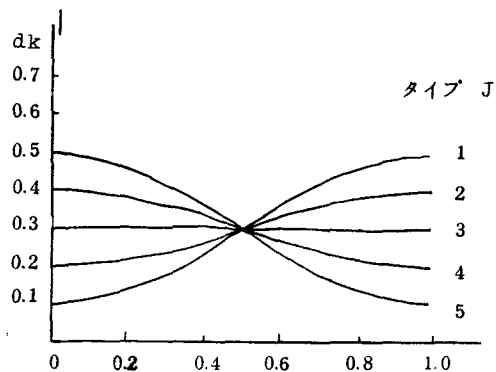


図1 初装荷燃料濃縮率分布

グ制約が解におよぼす影響が知られる。また、従来仮定されてきた出力分布一定方式による運転は必ずしも最適運転法とはならないことも明らかになった。

第4章 燃料交換を考慮した最適制御棒計画

この方法を、燃料交換効果を含めた場合について拡張した。通常、燃料交換を一定の方式で続けると、準定常的な状態変化のくり返し、すなわち平衡サイクル状態が得られることが知られている。平衡サイクルにおいては、各サイクルの最終状態 (t_E, b_E) は共通であり、かつこれを定めればサイクル始めの燃料分布も自動的に定まる。体系の領域の数を M 、各領域についての交換バッチ数を $N_i (i = 1, 2, \dots, M)$ 、ただし領域 i は区間 $x_{i-1} \leq x < x_i$ を表す。

この時、(t_E, b_E) を指定された場合の初期燃料分布は、パラレル交換については

$$\begin{aligned} \bar{k}_{\infty i}(x) &= \bar{k}_{\infty i}(x; t_E, b_E, N_i) = k_{\infty}^0 - \alpha \cdot \frac{N_i - 1}{2} \theta(x) \\ &= k_{\infty}^0 - \alpha \cdot \frac{N_i - 1}{2} \{ t_E \cdot w_1(x) + b_E \cdot w_2(x) \} \end{aligned} \quad (4-1)$$

シリーズ交換の場合 (e.g. out-in 交換) については

$$\bar{k}_{\infty i}(x) = k_{\infty}^0 - \alpha \cdot \sum_{j=i+1}^M N_j \theta_j - \alpha \cdot \frac{N_i - 1}{2} \theta(x) \quad (4-2)$$

$$\theta_j = \frac{1}{(x_j - x_{j-1})} \left\{ t_E \cdot \int_{x_{j-1}}^{x_j} w_1(x) dx + b_E \cdot \int_{x_{j-1}}^{x_j} w_2(x) dx \right\} \quad (4-3)$$

なる関係が得られる。このよう初期燃料分布をもつ体系に対して $t = 0$ で運転を開始し、 $t = t_E, b = b_E$ なる状態が達成できるかどうかを調べればよい。計算方法は、第3章に述べたものと大体同様である。得られた計算結果の例を図2に示す。各種交換方式について、出力ピーキング因子値の制約が、達成可能な最大燃焼度の大きさに与える影響が知られた。

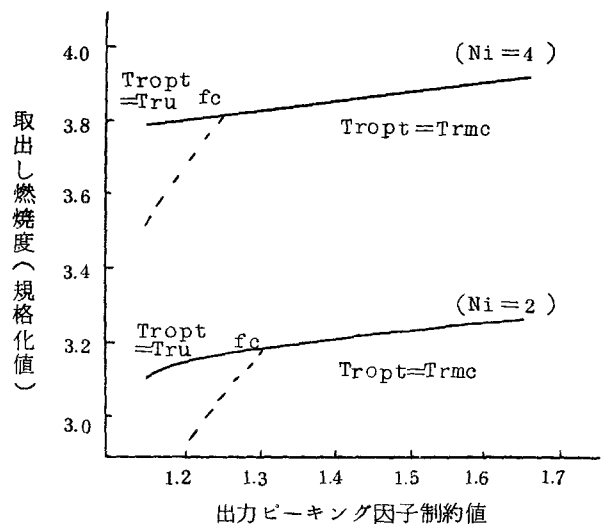


図2 燃料交換を含めた最適制御棒計画

図の点fを境として、最適制御棒計画のタイプは変化する。

点fの左側でも、右側と同様の運転法を採用すると、点線のように、達成できる燃焼度値が減少し、発電費に悪影響を与える。このような性質も設計に際しては考慮がはらわれるべきであると考えた。

第5章 設計の最適化に関する考察

上記のように、設計点決定に際しては、運転法を最適なものに定めておくことが必要と考えられる。燃料の取出し燃焼度と、出力ピーキング因子値をパラメータとして発電費を計算する。この計算結果と、図2のような最大燃焼

度曲線とをまとめて考察することにより、発電費の最小値を与える点、すなわち最適なパラメータの組を決定することは容易におこなえる。図3で、CASE-1のような場合は点 X_{D1} が、CASE-2のような場合は点 X_{D2} が最適点となり、これ以外の点を設計点として選べば、不可避免的に発電費の増大をまねくことは明らかである。

従来なされてきた出力分布一定の運転を仮定して設計点決定をお

こなった場合との比較も試みた。出力ピーキング因子に関する制約がきびしく、なるべく平坦化した出力分布が望ましい場合は、分布一定の運転法も最適となりうるが、この制約値に余裕がある場合には、分布を変可変として適正な制御をおこなう方が望ましく、これを考慮した設計により発電費を低下させることができることを確かめることができた。

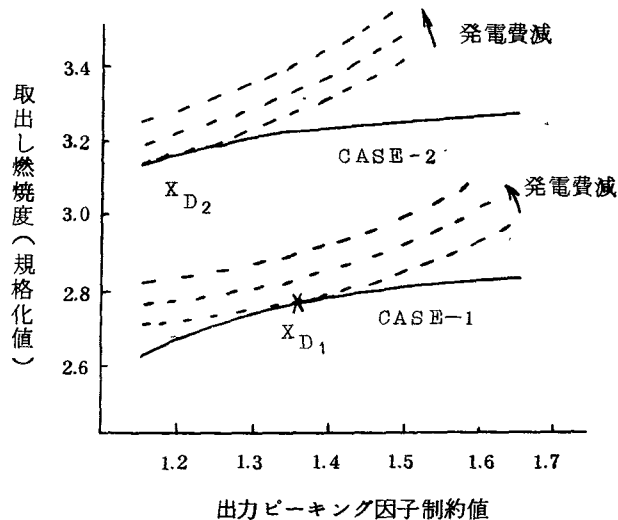


図3 設計点の決定法

第6章 手法の改良に関する考察

この章では前章までに示した手法の今後の発展のために解決さるべき若干の問題点に関し検討をおこなった。精度の改良のためには式(2-5)を、より一般化した形の展開すなわち

$$\phi(x, t) = a_1(t) \cdot w_1(x, t) + a_2(t) \cdot w_2(x, t) + \dots \quad (6-1)$$

のような展開を用いることが有効と考えられる。この際に、境界条件の適合性について難点が生ず

るが、中性子束分布近似計算に多用されるところの変分原理を若干修正することにより、この問題を処理することができた。また、モード近似とノード近似の間の対応について検討し、2モード近似と2ノード近似との間には等価な関係が成り立つことを確かめることができた。これは、より多領域体系の解析に際しては考慮すべき性質と考える。

第7章 結 論

本研究で示した手法は、燃焼過程最適化法としては

- 1) 多領域燃料交換を含む体系の燃焼最適化を、簡便かつ精度良くおこなうことが可能である：
- 2) その精度は、モード近似の良さにのみ依存して定まる：

という性質をもつ。さらに設計の最適化に応用した場合には、

- 3) 設計パラメータの最適化値を比較的容易に定めることができる：
- 4) その際とられるべき最適な運転法も同時に求められる：

などの特長を有する。このような性質から、本方法は原子炉設計最適化の基礎として有効に用いる手法であると考えらる次第である。

審 査 結 果 の 要 旨

原子力発電においては、大型、高出力の原子炉を有効に利用するために、合理的な炉心の設計方法、能率的な運転と制御方法を開発することが強く要望されている。これに応じて、現代制御理論の立場から原子炉システムの最適化をはかる研究が始められた。しかしながら、システムの複雑さから多くの未解明の問題が残されている。

本論文は、原子炉の炉心設計最適化問題を、下位に核燃料交換の方法と制御棒計画の最適化をもった階層構造問題としてとらえ、これら下部構造の最適化問題を解明する計算方法を開発し、それにもとづいて発電費最小化に関する研究にまで精細に検討を行なったもので全編7章よりなる。

第1章は緒言であり、関連ある従来の研究を相互に検討し、本研究の立場と意義を明確にしている。

第2章では制御棒計画最適化問題を扱い、この問題が炉心内中性子分布形状最適化問題に変換されることから、空間モードに展開する近似を行ない、臨界条件、出力ピーキング因子などの制約条件をもった非線形分布定数系を集中定数系に変換し、拡張された最大原理を用いて最適解をうる手法を開発した。これを反射体、フィードバック反応度をもつ現実炉系へ適用するための検討、さらに最適軌道の性質について考察を行ない、以下の各章での解析の手法を確立している。

第3章では、沸騰水型動力炉を空間的に一次元近似したモデルについて最適制御棒計画の解析を行ない、初期装荷燃料分布に対する燃焼過程最適軌道について興味のある結果を得ている。

第4章では、前章の解析を多領域にわたる燃料交換を考慮した場合について拡張して考察を行っている。その結果、出力ピーキング因子に関する制約値が到達可能な最大燃焼度の値に与える影響を定量的に得ているが、これは実用上有用な成果である。

第5章では、燃焼過程最適化の立場から要求される炉心設計の方法について考察し、最適設計点の決定手法を論じている。これは、発電費軽減効果への最適化手法の有効性を明らかにしたもので重要な知見である。

第6章では、本研究により得られた方法の拡張に必要な空間モードの合成法について、変分原理に基づいて検討を行なって具体的な例を示し、本手法の妥当性を明らかにしている。

第7章は結論である。

以上要するに、本論文は、複雑な原子炉システム最適化問題の求解法の新しい手法を現代制御理論を応用して開発し、核燃料の燃焼過程最適化を十分考慮した上での最適な原子炉設計が行なえることを明らかにしたものであり、原子核工学ならびに制御工学の進展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。